



Análise da Distribuição Espacial do Potencial Natural de Erosão de Quatro Áreas com Diferentes Topografias

Spatial Distribution Analysis of the Natural Erosion Potential of Four Areas with Different Topographies

João Pedro Inacio Alves¹ & Samuel de Assis Silva²

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Departamento de Geologia, Alto Universitário s/n, 29500-000, Alegre, ES, Brasil

²Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Rural, Alto Universitário s/n, 29500-000, Alegre, ES, Brasil
E-mails: joaopedro_inacio@hotmail.com; sasilva@pq.cnpq.br

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_2_199_207; Recebido: 17/04/2019 Aceito: 09/05/2020

Resumo

A erosão é um grande problema ambiental e um dos principais fatores de degradação do solo, reduzindo o potencial agrícola das áreas e gerando o assoreamento de canais fluviais. Para entender o comportamento do solo e estabelecer práticas conservacionistas para controle da erosão é muito utilizado no modelo de estimação de perda de solo a Equação Universal da Perda de Solo (EUPS). Outro índice utilizado no estudo da erosão é o Potencial Natural de Erosão (PNE), que é baseado na EUPS, o qual, aliado a geoestatística, é capaz de produzir bons resultados. Dessa forma, buscou-se com este trabalho avaliar a distribuição espacial do potencial natural de erosão em diferentes áreas de produção de café, utilizando análises geoestatísticas e técnicas de interpolação de dados. O estudo foi realizado para quatro áreas de produção de café localizadas em Araponga - MG. O PNE foi determinado através da EUPS suplantada das variáveis referentes ao fator uso e manejo do solo (C) e fator prática conservacionista (P). Foram testadas duas metodologias, a álgebra de mapas e a interpolação do PNE, e analisou-se o erro do mapa final para os dois métodos. O fator erodibilidade (K) apresentou dependência espacial para as áreas 01, 03 e 04, com índice de dependência espacial de moderado a forte, enquanto que o PNE apresentou dependência espacial para todas as áreas de estudo, com índice de dependência espacial forte. Todas as áreas tiveram PNE classificado como muito baixo, com exceção da área 01, que apresentou maiores valores de PNE devido a maior declividade e erodibilidade encontrada na parte mais alta da área. Independentemente da área, os valores mais baixos de PNE, estão associados principalmente, a distribuição espacial das frações granulométricas, que condicionam o fator K. A forma que é calculado o mapa final pode resultar em diferentes resultados, acumulando mais ou menos erros. Dentre os dois métodos utilizados o método 2 proporcionou melhores resultados, atingindo menores erros e permitindo um processamento mais rápido.

Palavras-chave: Geotecnologia; Erosão; Métodos de interpolação

Abstract

The erosion is one of the major environmental problems and one of the main factors of soil degradation, reducing the agricultural potential of the areas and generating the silting of the rivers. To understand soil behavior and establish conservationist practices for erosion control, the Universal Soil Loss Equation (USLE) is widely applied in the soil loss estimation model. Another index used in the study of erosion is the Natural Erosion Potential (NEP), which is based on the USLE, which, together with geostatistics, is capable to deliver good results. In this way, this work aimed to evaluate a potential spatial distribution of erosion in different areas of coffee production, using geostatistical analysis and data interpolation techniques. The study was carried out for the four coffee production areas in Araponga – MG, Brazil. The NEP was determined through the USLE supplanted the reference strategies to the factor use and soil management (C) and practical conservationist factor (P). Two methodologies, one map algebra and one NEP interpolation, were tested, and the final map error for the two methods was analyzed. The erodibility factor (K) presented the spatial emission conditions for areas 01, 03 and 04, with the spatial confidence index of moderate to strong, while the NEP presented the payment plan for all the study areas, with relation of strong spatial dependence. All areas had NEP with a greater slope and erodibility in the area. Regardless of the area, the lowest NEP values are associated mainly with a spatial distribution of the granulometric variables, which condition the K factor. The calculation of the final result can be translated into results, accumulating more or less errors. Among the two methods used method 2 provided results, accessing a smaller error and allowing a fast data flow.

Keywords: Geotechnology; Erosion; Interpolation methods

1 Introdução

A erosão é um fenômeno natural e constante, que consiste na remoção de partículas superficiais pela ação da água, vento e gravidade (Magalhães *et al.*, 2012). O efeito antrópico também é importante nos processos erosivos, entretanto o estudo da erosão considerando apenas os fatores naturais contribui para um entendimento mais aprofundado sobre como esses determinam o processo e a sua magnitude.

A degradação do solo causada pelos processos erosivos é um problema ambiental internacional (Brevik *et al.*, 2015; Gaubi *et al.*, 2016), causando, por exemplo, a redução de seu potencial agrícola e levando ao assoreamento de canais fluviais (Dechen *et al.*, 2015). Sabe-se que erosão do solo tem elevada contribuição antropogênica, assim as ocupações urbanas assumem um papel significativo na degradação do solo, possibilitando a formação de muitos depósitos tecnogênicos (Miyazaki *et al.*, 2017).

As características do terreno assumem importante atuação no mecanismo de erosão do solo, se destacando a declividade, aspecto e forma do terreno (Ganasri & Ramesh, 2016). O clima é outro fator responsável por causar a variabilidade espacial e temporal da erosão do solo (Mabit *et al.*, 2008), logo, a erosão pode ser fortemente influenciada pela sazonalidade climática.

Para entender como a erosão se desenvolve em meio aos fatores naturais e antrópicos, são utilizados modelos empíricos de erosão do solo, permitindo fácil interpretação física e exigindo pequena quantidade de recursos (Ganasri & Ramesh, 2016). Tais modelos empíricos podem ser importantes para planejar medidas de conservação do solo (Vaezi *et al.*, 2016).

O modelo da Equação Universal da Perda de Solos (EUPS) se mostra muito eficaz, compondo boa relação com as técnicas do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o sensoriamento remoto, o que permite avaliar a distribuição espacial dos processos de erosão do solo com precisão aceitável (Gaubí *et al.*, 2016). A estimativa da perda de solo no modelo da EUPS considera fatores de intervenção antrópica, além dos fatores naturais (Morais & Sales, 2017). Quando avaliado apenas as características físicas do solo e do terreno é obtido o Potencial Natural de Erosão (PNE) (Wischmeier & Smith, 1978), que

corresponde à perda de solo nas condições naturais, ou seja, sem intervenção antrópica e desprovido de vegetação.

A utilização de modelos empíricos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) exige critérios que atribuem maior acurácia ao produto cartográfico, isto porque o acúmulo de erros no mapa final pode gerar resultados que não correspondem aos processos físicos naturais do solo (Júnior, 2016). Dessa forma, é necessário utilizar uma metodologia que resulte na menor quantidade de erros possíveis.

A geoestatística é utilizada para análise e interpretação da dependência espacial de diferentes atributos, a exemplo do solo, sendo uma ferramenta muito útil nesse processo, permitindo a geração de mapas de distribuição espacial usando o interpolador da krigagem (Cajazeira & Assis Júnior, 2011). A krigagem é um método de interpolação geoestatístico e, diferentemente de outros métodos, considera a estrutura da variabilidade espacial determinada a partir da análise variográfica, fazendo uma exposição mais precisa da estrutura dos dados, produzindo informações valiosas sobre a distribuição da estimativa do erro (Silva *et al.*, 2008).

Com este trabalho objetivou-se avaliar a variabilidade espacial do potencial natural de erosão de diferentes áreas de produção de café localizadas em diferentes altitudes sob duas metodologias distintas, utilizando-se análises geoestatísticas e técnicas de interpolação de dados empregados na erodibilidade do solo e álgebra de mapas, com o intuito de fornecer subsídios na descrição de padrões de ocorrência de erosão.

2 Área de Estudo

O estudo foi executado a partir de dados coletados em quatro áreas de produção de café localizadas no município de Araponga, estado de Minas Gerais, na Mesorregião da Zona da Mata Mineira, atualmente denominada Serras de Minas (Figura 1). Possui altitude média de cerca de 1300 m (variando de 600 m a 2000 m de altitude). O clima da região é do tipo tropical de altitude com temperatura média anual em torno de 19° C, com variações entre 12° (média das mínimas) e 26° C (média das máximas) e chuvas no verão, apresentando precipitação pluviométrica média anual de aproximadamente 1300 mm (Silva, 2012).

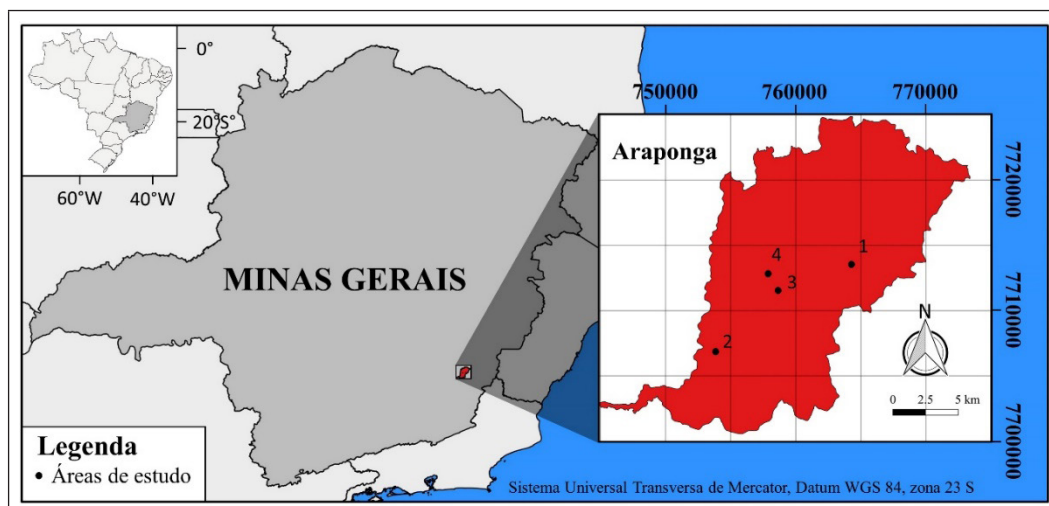


Figura 1 Localização das áreas de estudo.

As áreas de produção utilizadas nesta pesquisa estão inseridas em um extrato de altitude variando de 770 a aproximadamente 1300m, correspondendo a quatro áreas de produção de café arábica. Os tamanhos das áreas envolvidas nesse estudo são: 4,9 ha (Área 1), 6,9 ha (Área 2), 3,1 ha (Área 3) e 2,8 ha (Área 4). O espaçamento utilizado para o cultivo dos cafeeiros foi igual para todas as áreas, sendo de 2 m entre linhas e 0,5 m entre plantas. Em todas as áreas predomina o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico com textura de argilosa a muito argilosa e horizonte A moderado.

3 Materiais e Métodos

Para o cálculo do PNE de cada área, foi utilizada a EUPS desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978), excluindo-se as variáveis referentes ao fator uso e manejo do solo (C) e fator prática conservacionista (P), conforme Mello *et al.* (2006):

$$PNE = R \cdot K \cdot LS \quad (1)$$

em que: PNE – potencial natural de erosão, t.ha⁻¹.ano⁻¹; R – fator erosividade da chuva, MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹; K – fator erodibilidade do solo, t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹; LS – fator topográfico da equação (adimensional).

Os mapas do PNE foram gerados a partir de duas metodologias diferentes. O método 1 consistiu em gerar o mapa do fator erodibilidade, valor médio de erosividade das chuvas e o mapa do fator topográfico, para depois gerar o mapa final do PNE do solo a partir da álgebra de mapas. Enquanto que o método 2 consistiu em obter o PNE do solo em cada ponto amostrado para depois a partir da krigagem gerar o mapa do PNE. Em todos os mapas

interpolados, utilizou-se a krigagem por se tratar de um método de interpolação linear não-viesado, cujas estimativas são combinações de pesos lineares para os dados originais, minimizando a variância dos erros e objetivando obter erro residual médio igual a zero (Isaaks & Srivastava, 1989).

O fator erosividade das chuvas (R) foi calculado, para cada área, a partir da equação desenvolvida por Bertoni & Lombardi Neto (1999):

$$EI = 67,335 \left(\frac{r^2}{p} \right)^{0,85} \quad (2)$$

em que: EI – média mensal do índice de erosão, em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹; r – precipitação média mensal, em mm; P – precipitação média anual, em mm.

A erosividade das chuvas foi determinada a partir de valores de precipitação pluviométrica oriundos de um conjunto de dados meteorológicos em grade, organizado por Xavier *et al.* (2016), para o período de 1980 até 2013. O banco de dados é composto por valores interpolados a partir de informações de precipitação diária obtida de 3625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas espalhadas por todo o país.

A erodibilidade (K) do solo foi estimada através do modelo indireto utilizado por Bertoni & Lombardi Neto (1999) e Silva *et al.* (2007), segundo a equação:

$$K = \left(\frac{\% \text{ areia} + \% \text{ silte}}{\% \text{ argila}} \right) / 100 \quad (3)$$

Em que: K – fator erodibilidade, em t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹.

Para isso foram utilizados dados granulométricos dos solos das quatro áreas em estudo.

Estes dados foram obtidos a partir de malhas irregulares com 80 pontos amostrais nas áreas 1 e 2, e 100 pontos amostrais nas áreas 3 e 4, os quais foram georreferenciados utilizando um DGPS (L1) Marca Magellan, Modelo Promark 3, com correção diferencial pós-processada.

As amostras foram coletadas na camada de 0 a 20 cm e analisadas em laboratório para definição das frações areia grossa a argila, segundo metodologia de Teixeira *et al.* (2017).

Para o cálculo do fator topográfico (LS) foi utilizada a metodologia proposta por Berton & Lombardi Neto (1999), conforme a seguinte equação:

$$LS = 0,00984 \cdot C^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (4)$$

em que: LS – fator topográfico; C – comprimento de rampa, em m; e; D – declividade, em %.

Para construção dos mapas de declividade utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado a partir de dados de altimetria provenientes de levantamento topográfico feito nas áreas, respeitando as malhas amostrais descritas acima (80 pontos nas áreas 1 e 2 e 100 pontos nas áreas 3 e 4). Para o levantamento topográfico utilizou-se um receptor GNSS geodésico de precisão sub-centimétrica, com correção pós-processada (a partir das bases da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC). Os dados de altimetria de cada ponto amostral foram interpolados por krigagem para construção do MDE, com uma resolução espacial de 500 x 500 pontos (pixels de 0,78 x 0,78m). A declividade foi obtida no software Quantum GIS versão 2.18.11, com resolução espacial compatível com os demais mapas.

Os valores de comprimento de rampa (C) foram obtidos pela equação trigonométrica adaptada ao sistema SIG utilizada por Coutinho *et al.* (2014):

$$C = \sqrt{Px^2 + (D/100) \cdot Px} \quad (5)$$

em que: C – comprimento de rampa, em m; Px – comprimento do pixel, em m; e; D – declividade, em %.

Os dados foram submetidos a análise estatística e geoestatística. A normalidade dos dados foi definida pelo teste Shapiro-Wilk's a 5% de probabilidade. O coeficiente de variação (CV) foi classificado de acordo com a classificação de Warrick & Nielsen (1980), que atribui CV < 12 %

como baixa, 12 % < CV < 60 % média e CV > 60 % alta variabilidade.

A análise geoestatística foi feita a partir do software GS+, a qual buscou-se avaliar o atendimento da hipótese de estacionaridade assumida por meio de ajuste de variogramas estimado pela seguinte equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [(Z_{xi}) - (Z_{xi+h})]^2 \quad (6)$$

em que: N(h) – número de pares de valores medidos Z(xi), Z(xi+h), separados por um vetor h.

Após realizar o ajuste do variograma experimental foi feito o escalonamento para os valores de efeito pepita (C0) e para o patamar (C+C0) utilizando as variâncias. Para as variáveis que apresentaram dependência espacial os dados foram interpolados para construção de mapas temáticos para cada área amostral, apresentando os mapas de PNE em modelos 3D, gerados no software Surfer 10.3. Para as variáveis que não apresentaram dependência espacial, assumiu-se que os dados variam de forma aleatória, impossibilitando a interpolação dos mesmos para a geração dos mapas, adotando-se a média aritmética dos dados.

Além disso, foi calculado e analisado o erro absoluto do mapa de PNE, conforme equação utilizada por Silva *et al.* (2008):

$$e = \frac{|V_c - V_p|}{V_p} \quad (7)$$

em que: e – erro, em porcentagem; V_c – valor calculado; V_p – valor predito.

Para comparar os resultados entre cada área, também foi feito a análise visual dos mapas temáticos.

4 Resultados e Discussão

Para a caracterização da área e visando sustentar os resultados e conclusões da pesquisa, foram construídos os mapas de declividade para cada área em estudo (Figura 2). É possível observar que a área 1 é a que apresenta maior variação de declividade e igualmente os maiores valores (grande proporção da área com valores superiores a 60% de declividade). Por sua vez, a área 3 é a que tem menor variabilidade para essa característica, com a quase totalidade dos valores entre 4 e 32% de declividade.

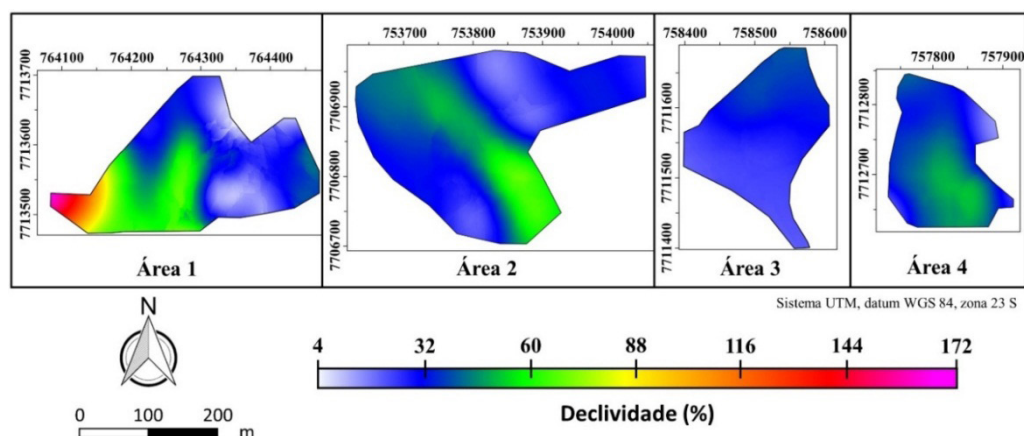


Figura 2 Mapas de declividade das áreas de estudo, expresso em porcentagem.

Os resultados obtidos pela análise estatística descritiva demonstram que o fator LS da área 1 teve CV classificado como alta variação, isto porque essa é a área que tem a maior amplitude altimétrica, conseqüentemente essa variação de altitude gera

declividades mais acentuadas (Figura 2), que colabora diretamente para os elevados valores de PNE da área (CV classificado como alta variação) (Tabela 1).

Área	Atributos do solo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	Cs	Ck	CV	SW
1	K	0,0105	0,0101	0,0029	0,0303	0,0036	2,0867	10,8520	34,79	*
	LS	0,7621	0,5189	0,1220	4,3563	0,8091	2,6831	8,2634	106,2	*
	PNE	61.03	36.47	11.14	272.11	68.18	2.15	3.69	111.72	*
2	K	0,0085	0,0075	0,0002	0,0176	0,0034	0,8187	0,8433	40,14	*
	LS	0,6160	0,5481	0,1926	1,2500	0,2841	0,6983	-0,4576	46,13	*
	PNE	36.08	35.05	11.71	67.01	14.38	0.17	-1.10	39.87	*
3	K	0,0137	0,0133	0,0047	0,0285	0,0046	0,7578	0,5943	33,69	*
	LS	0,4329	0,4329	0,2573	0,6063	0,1136	0,0626	-1,4798	26,25	*
	PNE	43.54	38.53	14.94	95.91	19.26	0.77	-0.13	44.23	*
4	K	0,0087	0,0067	0,0013	0,1351	0,0132	9,1129	88,043	151,91	*
	LS	0,5465	0,5518	0,1752	0,8670	0,1704	-0,1640	-0,5272	31,19	*
	PNE	29.98	26.77	6.21	70.17	14.19	0.74	0.20	47.33	*

Tabela 1 Estatística descritiva das frações do solo, dos fatores erodibilidade (K) e topográfico (LS), e do potencial natural de erosão (PNE) dos pontos das áreas de estudo. K = erodibilidade, em t. h. ha⁻¹. MJ⁻¹. mm⁻¹. LS = fator topográfico, em MJ. mm. ha⁻¹. h⁻¹. ano⁻¹. PNE = potencial natural de erosão, em t.ha⁻¹.ano⁻¹. s = desvio padrão. Cs = coeficiente de assimetria. Ck = coeficiente de curtose. CV = coeficiente de variação. SW = teste Shapiro-Wilk. ns = distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilk a 5 % de probabilidade.

OPNE da área 1 alcança o maior valor máximo e também o maior valor médio entre as quatro áreas de estudo. O fator erodibilidade da área 4 teve CV classificado como alta variação, o que significa que na área ocorre uma maior variabilidade do PNE em função da erodibilidade em relação as outras áreas. Os demais atributos do solo tiveram CV médio, de acordo com a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980).

Os maiores valores de erodibilidade são observados nas áreas 1 e 3. Souza & Sobreira

(2017) encontraram valores de K para o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura argilosa próximos dos valores obtidos nas áreas de estudo. Moraes & Sales (2017) encontraram valor de K em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico superior ao desse trabalho, classificando o solo como de erodibilidade muito baixa. Nesse sentido, destaca-se a característica pouco erodível do solo em questão, resultando em menores valores de PNE.

O coeficiente de assimetria do fator LS na

área 3 foi próximo de zero, com semelhança para os valores de média e mediana, indicando que boa parte da variabilidade do PNE nessa área se dá em função do fator K. Os coeficientes de assimetria e curtose estimados para os fatores analisados são bem distantes dos valores da distribuição normal. Resultados semelhantes foram observados por Mello *et al.* (2006), os quais comentam que a ocorrência de valores assimétricos para as variáveis de estudo

do solo pode ser um indicativo que as medidas de tendência central são dominadas por valores atípicos na distribuição.

Na análise geoestatística (Tabela 2) observou-se que os modelos de variogramas que melhor se ajustaram ao fator K foram o esférico e exponencial. Para o PNE, os melhores modelos que se ajustaram foram o esférico e o gaussiano.

Área	Atributo	Modelo	C_0	$C_0 + C$	Alcance	IDE	R^2
1	K (M1)	Esférico	0,15	0,38	113	54	79
	PNE (M2)	Gaussiano	0.02	0.45	147	96	96
2	K (M1)	EPP	-	-	-	-	-
	PNE (M2)	Esférico	0.30	1.85	135	84	95
3	K (M1)	Esférico	0,09	0,47	118	84	99
	PNE (M2)	Esférico	0.13	1.93	218	93	98
4	K (M1)	Exponencial	0,01	0,05	90	79	98
	PNE (M2)	Esférico	0.26	1.83	78	86	93

Tabela 2 Modelos e parâmetros estimados dos variogramas ajustados para o fator erodibilidade (K) nas áreas de estudo. K (M1) = erodibilidade dos solos, utilizado na álgebra de mapas do método 1. PNE (M2) = potencial natural de erosão resultante do método 2. C_0 = efeito pepita, escalonado a partir da variância. $C_0 + C$ = patamar. IDE = índice de dependência espacial (C/C_0+C), expresso em %. R^2 = Coeficiente de determinação, expresso em %.

As áreas 01 e 02 tiveram os piores ajustes, chegando a ocorrer efeito pepita puro (EPP) na área 02, indicando uma distribuição estatisticamente aleatória do fator K nessa área. Nesse caso para o cálculo do PNE foi utilizado o valor médio do fator K. Na área 2 o fator K não apresentou dependência espacial, enquanto o PNE apresenta, neste caso, obtém-se um melhor resultado utilizando o método 2, pois quando o fator K não apresenta dependência espacial toda distribuição espacial do PNE fica condicionada pelo fator LS e dessa forma não estaria representando da melhor forma a distribuição do PNE.

Na área 2 o fator K não apresentou dependência espacial, enquanto o PNE apresenta, neste caso, obtém-se um melhor resultado utilizando o método 2, pois quando o fator K não apresenta dependência espacial toda distribuição espacial do PNE fica condicionada pelo fator LS e dessa forma não estaria representando da melhor forma a distribuição do PNE.

Segundo a classificação proposta por Zimback (2001), o fator K na área 1 apresenta índice de dependência espacial moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$), e nas áreas 3 e 4 o índice de dependência espacial é classificado como forte ($IDE \geq 75\%$). O

PNE apresenta índice de dependência espacial forte para todas as áreas de estudo.

O menor índice de dependência espacial foi encontrado na área 1, que provavelmente está associado à topografia mais acidentada do terreno, que impõe uma maior variação às frações granulométricas do solo, no entanto, quando feito a interpolação do PNE observa-se o maior índice de dependência espacial na área 1, enquanto que na área 3, menos íngreme, foi encontrado o melhor ajuste e o maior IDE para o fator K.

Em todas as áreas as maiores médias dos erros da krigagem ocorrem quando se utiliza o método 1 (Tabela 3). No método 1 os erros de cada mapa são acumulados no mapa final, resultando em um mapa do PNE com maior erro do que o mapa obtido com o método 2, em que o único erro atribuído ao mapa é o erro da interpolação do PNE.

Para o fator R foi obtido um valor de erosividade das chuvas de 7292,42 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para a área 01 e outro valor de 7292,10 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para as áreas 02, 03 e 04. De acordo com a classificação da erosividade das chuvas proposta por Carvalho (1994) o fator R para as áreas de estudo são classificados como moderado a forte.

Área	Método (PNE)	Erro Médio	Erro Mínimo	Erro Máximo	Método (PNE)	Erro Médio	Erro Mínimo	Erro Máximo
1	M1	35.12	0.55	143.58	M2	20.13	0.19	121.75
2		35.32	1.73	97.88		22.62	0.23	149.09
3		42.54	0.05	116.37		8.86	0.13	107.71
4		34.38	1.54	82.83		14.88	0.00	96.11

Tabela 3 Erros da krigagem do PNE, em porcentagem, para as duas metodologias utilizadas, M1 e M2, nas áreas de estudo. M1 = método 1. M2 = método 2.

Um fato interessante diz respeito à variabilidade espacial do K. Conforme já discutido, observa-se que mesmo antes de realizar a álgebra de mapas a erodibilidade apresentou menor continuidade espacial, consequentemente um maior erro de interpolação. Quando feita a álgebra de mapas dos fatores K, LS e R os erros gerados durante a interpolação dos mapas são multiplicados, gerando erros ainda maiores no mapa final de PNE.

Com base nos mapas temáticos para representação do PNE com modelo digital de terreno 3D (Figura 3) é possível observar que uma mesma área apresenta diferentes formas de vertente, variando de côncava a convexa, passando em alguns pontos pela linear. Segundo Campos *et al.* (2007) as frações granulométricas que compõe o solo apresentam dependência espacial em função do relevo, ocorre da mesma forma para o fator K. Segundo (Silva *et al.*, 2007) a perda de solo pode estar relacionada a distribuição espacial das frações do solo. Nas áreas 3 e 4 observa-se uma maior influência das frações do solo, pelo fator K, do que nas áreas 1 e 2, isso porque as áreas possuem menores valores do fator LS, ou seja, possuem relevo menos declivoso. As regiões que apresentam maior potencial natural de erosão correspondem a uma forma de vertente convexa, corroborando os resultados de Sanchez *et al.* (2009) que encontraram as maiores perdas de solo nessa forma de vertente em um argisolo vermelho-amarelo eutrófico textura média/argilosa cultivado com cana-de-açúcar.

Os mapas de PNE revelam padrões semelhantes nas duas metodologias utilizadas, no entanto, é possível observar que os mapas obtidos com o método 1 possuem maior relação com a

declividade, com maiores valores nas regiões mais declivosas, isso porque a álgebra de mapas permite que o fator LS assumam maior relevância. Já os mapas obtidos com o método 2 apresentam variações que muitas vezes estão condicionadas pela erodibilidade do solo.

Acerca dos erros de interpolação, esses são maiores para o método 1, principalmente para a área 4, onde é possível observar manchas semicirculares, associadas a desvios elevados na estimativa do fenômeno. Por esse método compreender a álgebra entre diferentes mapas que foram previamente interpolados, há um acúmulo de erros de interpolações individuais, resultando em produtos finais com maiores desvios. É válido ressaltar que nessa metodologia (método 1), a imprecisão de uma ou mais interpolações pode comprometer o resultado final, mesmo que os erros para as outras variáveis sejam reduzidos.

Todas as áreas de estudo tiveram como resultado um PNE classificado como muito baixo, com exceção da área 01, que atinge PNE moderado em uma pequena porção da área localizada no sudoeste da mesma. Conforme classificação apresentada por Lagrotti (2000), que o PNE é classificado em: muito baixo (< 250); baixo (250 – 500); moderado (500 – 750); alto (750 – 1000) e muito alto (> 1000).

Com exceção da área 1 todas as áreas apresentaram PNE muito baixo. Observou-se que em todas as áreas de estudo a variabilidade espacial do PNE está sendo mais condicionada pelo fator LS. Na área 1 ocorrem valores mais altos de PNE apenas na parte mais íngreme da área que também apresenta elevada erodibilidade do solo.

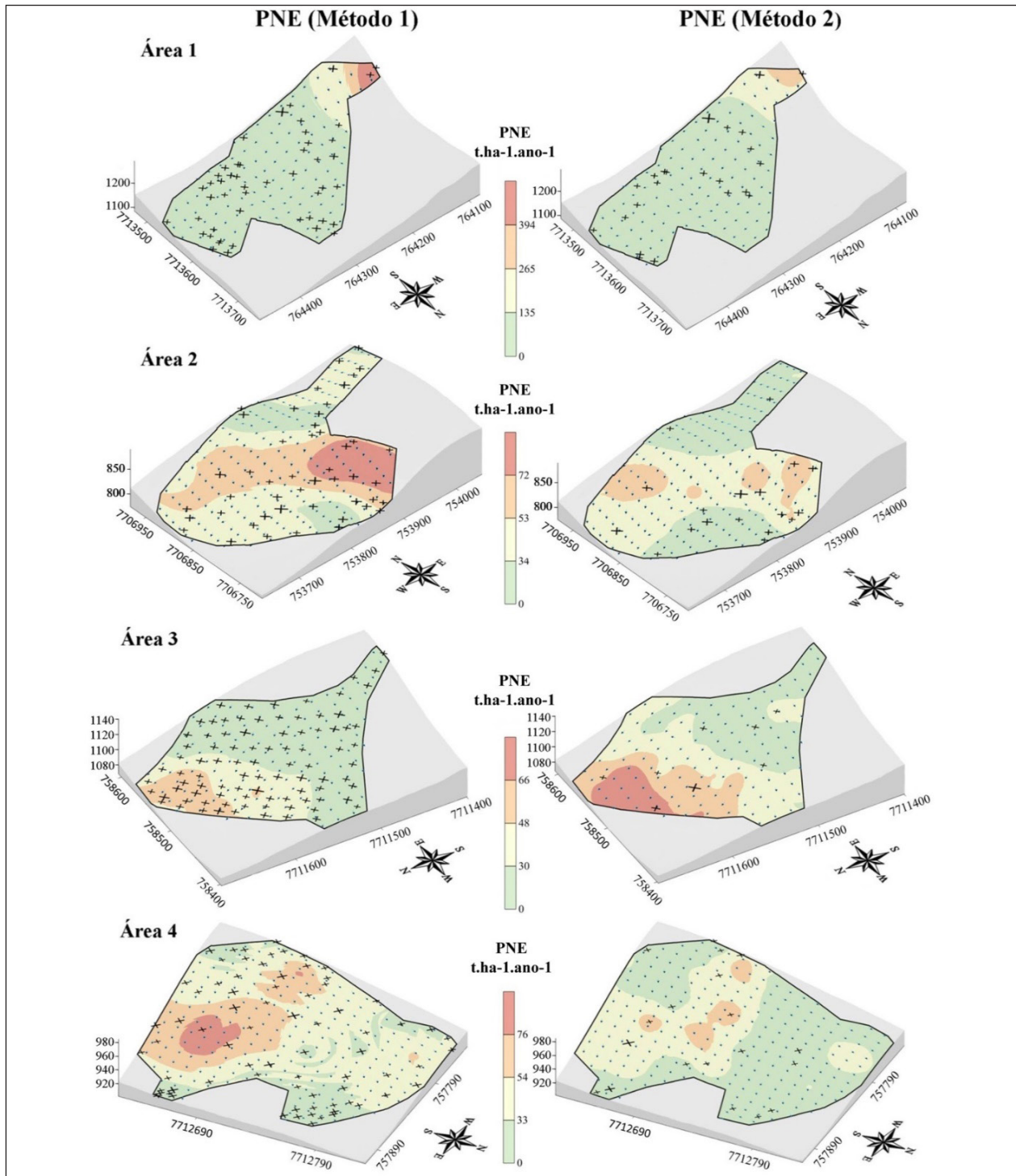


Figura 3 Mapas de PNE das áreas de estudo com: modelo 3D para os métodos 1 e 2; vetores de escoamento superficial da água na superfície do terreno, e; cruzes representando os maiores erros nos pontos de amostragem, com tamanho proporcional ao erro.

5 Conclusões

O método 1 para o cálculo do PNE apresentou maior quantidade de erros, além disso é mais trabalhoso e leva mais tempo para ser realizado que o método 2.

A vantagem do método 1 é que se calcula os mapas individuais de cada fator para depois executar a álgebra de mapas, o que possibilita avaliar quais

fatores são mais condicionantes e onde exercem maior influência.

O padrão erosivo observado nas áreas está relacionado às regiões com maior declividade da área, contudo, para as áreas em que o terreno não possui declividade muito variada, o fator LS não contribui para maior variabilidade espacial do PNE, dessa forma o fator K passa a exercer maior influência na variabilidade espacial do PNE.

6 Referências

- Bertoni, J. & Lombardi Neto, F. 1999. *Conservação do Solo*. São Paulo, Ícone, 355p.
- Brevik, E.C.; Cerdà, A.; Mataix-Solera, J.; Pereg, L.; Quinton, J.N.; Six, J. & Van Oost, K. 2015. The Interdisciplinary Nature of Soil. *SOIL*, 1(1): 117-129.
- Cajazeira, J.P. & Assis Júnior, R.N. 2011. Variabilidade Espacial das Frações Primárias e Agregados de Um Argissolo no Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, 42(2): 258-267.
- Campos, M.C.C.; Marques Junior, J.; Pereira, G.T.; Montanari, R. & Siqueira, D.S. 2007. Variabilidade Espacial da Textura de Solos de Diferentes Materiais de Origem em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agronômica*, 38(2): 149-157.
- Carvalho, N.O. 1994. *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro, CPRM, 372p.
- Coutinho, L.M.; Cecílio, R.A.; Garcia, G.O.; Xavier, A.C.; Zanetti, S.S. & Moreira, M.C. 2014. Cálculo do Fator LS da Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS) Para a Bacia do Rio da Prata, Castelo-ES. *Revista Agro@mbiente On-line*, 8: 1-9.
- Dechen, S.C.F.; Telles, T.S.; Guimarães, M.F. & De Maria, I.C. 2015. Perdas e Custos Associados à Erosão Hídrica em Função da Cobertura de Solo. *Bragantia*, 74(2): 224-233.
- Ganasri, B.P. & Ramesh, H. 2016. Assessment of Soil Erosion by RUSLE Model Using Remote Sensing and GIS - A Case Study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6): 953-961.
- Gaub, I.; Chaabani, A.; Ben Mammou, A. & Hamza, M.H. 2016. A GIS-based Soil Erosion Prediction Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna Watershed, Cap Bon, Tunisia). *Natural Hazards*, 86: 219-239.
- Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, Oxford University Press, 561p.
- Júnior, A.A.C. 2016. *Erosão Hídrica e Transporte de Sedimentos na Bacia do Ribeirão Cachoeirinha, Rio Claro (SP)*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Dissertação de Mestrado, 80p.
- Lagrotti, C.A.A. 2000. *Planejamento Agroambiental do Município de Santo Antônio do Jardim, SP: Estudo de Caso na Microbacia Hidrográfica do Córrego do Jardim*. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 115p.
- Mabit, L.; Bernard, C.; Makhlof, M. & Laverdière, M.R. 2008. Spatial Variability of Erosion and Soil Organic Matter Content Estimated From ¹³⁷Cs Measurements and Geostatistics. *Geoderma*, 145(3): 245-251.
- Magalhães, I.A.I.; Nery, C.V.M.; Zanetti, S.S.; Pena, F.E.R.; Avelino, R.C. & Santos, A.R. 2012. Uso de Geotecnologias para Estimativas de Solos e Identificação das Áreas Suscetíveis a Erosão Laminar na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Vieira, Município de Montes Claros-MG. *Cadernos de Geociências*, 9(2): 74-84.
- Mello, G.; Bueno, C.R.P. & Pereira, G.T. 2006. Variabilidade Espacial de Perdas de Solo do Potencial Natural e Risco de Erosão em Áreas Intensamente Cultivadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(2): 315-322.
- Miyazaki, L.C.P.; Silva, E.C.N. & Nunes, J.O.R. 2017. Transformações na Paisagem e Formação de Depósitos Tecnogênicos em Conjuntos Habitacionais de Presidente Prudente-SP. *Revista Formação (ONLINE)*, 25(1): 105-131.
- Morais, R.C.S. & Sales, M.C.L. 2017. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com Uso de Sistema de Informação Geográfica. *Caderno de Geografia*, 27: 84-105.
- Sanchez, R.B.; Marques Júnior, J.; Souza, Z.M.; Pereira, G.T. & Martins Filho, M.V. 2009. Variabilidade Espacial de Atributos do Solo e de Fatores de Erosão em Diferentes Pedofórmias. *Bragantia*, 68(4): 1095-1103.
- Silva, S.A.; Lima, J.S.S.; Oliveira, R.B.; Souza, G.S. & Silva, M.A. 2007. Análise Espacial da Erosão Hídrica em Um Latossolo Vermelho Amarelo Sob Cultivo de Café Conilon. *Revista Ciência Agronômica*, 38(4): 335-342.
- Silva, S.A.; Lima, J.S.S.; Souza, G.S. & Oliveira, R.B. 2008. Avaliação de Interpoladores Estatísticos e Determinísticos na Estimativa de Atributos do Solo em Agricultura de Precisão. *IDESIA*, 26(2): 75-81.
- Silva, S.A. 2012. *Terroir de Café em Lavouras no Município de Araponga – MG*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Tese de Doutorado, 109 p.
- Souza, L.A. & Sobreira, F.G. 2017. A Avaliação da Geração de Sedimentos ao Longo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Carmo. Potencial Natural de Erosão, Feições Morfológicas e Cicatrizes de Movimentos de Massa. *Geociências*, 36(2): 285-299.
- Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. (Eds). 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Brasília, EMBRAPA, 3. ed., 574p.
- Vaezi, A.R.; Hasanzadeh, H. & Cerdà, A. 2016. Developing an Erodibility Triangle for Soil Textures in Semi-arid regions, NW Iran. *Catena*, 142: 221-232.
- Warrick, A.W. & Nielsen, D.R. 1980. Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field. In: HILLEL, D. (ed.) *Applications of soil physics*. Academic Press, p. 319-344.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington, United States Department of Agriculture, 58p.
- Xavier, A.C.; King, C.W. & Scanlon, B.R. 2016. Daily Gridded Meteorological Variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, 36: 2644-2659.
- Zimback, C.R.L. 2001. *Análise Espacial de Atributos Químicos de Solos para Fins de Mapeamento da Fertilidade do Solo*. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Tese de Doutorado, 114p.